

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ЭЛЕКТРОНАГРЕВЕ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОГО КОВША

Аннотация

В работе представлена математическая модель разогрева сталеразливочного ковша с использованием электронагревателя. Для расчета теплообмена излучением между поверхностями футеровки, крышки и нагревательными элементами применен зональный метод. Задача теплопроводности для каждого участка футеровки решалась методом конечных разностей. Приведены результаты расчетов разогрева сталеразливочного ковша емкостью 50 тонн. Показаны зависимости изменения тепловых потоков и температуры поверхностей по высоте боковой стенки ковша, а также распределения температуры по толщине футеровки.

Ключевые слова: электронагрев, сталеразливочный ковш, футеровка, математическое моделирование, теплообмен.

Abstract

This study represents the mathematical model of steel teeming ladle heating using electric heater. The zone method was used to calculate the radiative heat transfer between refractory line, lid, and heating elements. Heat conductivity for each line section was calculated by finite difference method. The results of calculation of steel teeming ladle heating (up to 50 tons) are represented. The dependences of heat flux change and surface temperature upon the height of the ladle's side wall is presented. The temperature distribution over the refractory line's thickness is presented, too.

Keywords: electric heating, steel teeming ladle, refractory line, mathematical model, heat transfer.

Как известно, тепловая обработка футеровок сталеразливочных ковшей проходит на специальных стендах сушки и разогрева. Для отопления этих установках чаще используется теплота сжигаемого топлива, однако в последнее время альтернативой стал электронагрев [1]. При использовании электрических стендов для тепловой подготовки ковшей обеспечивается высокий КПД, реализация температурного режима любой сложности, снижение загазо-

ванности рабочей площадки [2]. Однако возникают проблемы с эксплуатацией нагревательных элементов и силового электрического оборудования.

На сегодняшний день представляет интерес исследование компоновки электронагревателей и их расположения в ковше на качество разогрева и сушки, выбор оптимальных параметров нагрева с обеспечением технологичности процесса и экономии топливно-энергетических ресурсов. Ниже описана математическая модель разогрева ковша при использовании электронагрева.

Для моделирования процесса разогрева сталеразливочного ковша принято, что ковш имеет форму полого цилиндра с плоским дном и плоской крышкой (рис. 1). Стенка цилиндра имеет внутренний радиус R_1 и наружный радиус R_2 . Высота внутреннего пространства – H . Дно и крышка цилиндра имеют соответственно толщину S_1 и S_2 . На крышке расположен электронагреватель, который представляет собой ряд одинаковых цилиндров диаметром d и высотой h , равномерно расположенных по окружности радиусом R_3 в центре крышки.

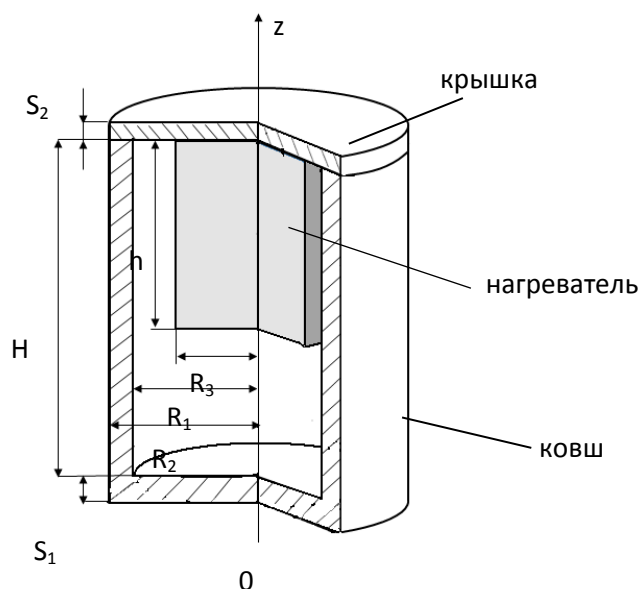


Рис. 1. Схема сталеразливочного ковша с электрическим нагревателем

В начальный момент времени стенки, дно и крышка ковша имеют температуру t_0 . Температура электронагревателя в течение процесса нагрева остается постоянной и равной T_n . Передача теплоты от нагревателя к ковшу и крышке осуществляется исключительно излучением. При этом все поверхности являются серыми и диффузными. Прогрев стенок ковша и крышки происходит теплопроводностью только по толщине футеровки. С наружных поверхностей ковша теплота теряется в окружающую среду конвекцией и излучением.

Для расчета теплообмена излучением внутри ковша применяется зональный метод. Внутренняя поверхность цилиндрической стенки ковша условно разбивается на N_z равных участков высотой $\Delta z = H / N_z$. На внутренней поверхности крышки выделяется две зоны – внутренняя и внешняя. Первая из них находится внутри окружности, образованной нагревателями радиусом R_n , а вторая занимает остальную часть поверхности крышки.

На поверхности донной части ковша располагаются внутренняя и внешняя зоны днища, имеющие такие же размеры, как и зоны крышки. Таким образом, внутренняя поверхность

ковша разделена на $(N_z + 4)$ зон. К ним добавляется зона, представляющая поверхность всех элементов электронагревателя. Ей присваивается номер 0.

Плотности тепловых потоков на зоны системы рассчитываются как:

$$q_i = \sigma_0 \varepsilon_i \sum_{j=0}^{N_z+4} \varepsilon_j f_{ij} (T_j^4 - T_i^4), \quad i = 1, 2, \dots, N_z + 4, \quad (1)$$

где q_i – плотность результирующего теплового потока излучением падающего на зону i , Вт/м²; $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – коэффициент излучения черного тела; ε_i и ε_j – степени черноты зон i и j ; T_i и T_j – температуры зон i и j , К; f_{ij} – разрешающий угловой коэффициент излучения с зоны i на зону j .

Разрешающие угловые коэффициенты учитывают многократные отражения лучистых потоков от серых поверхностей системы и находятся из решения следующей системы уравнений:

$$f_{ij} = \varphi_{ij} + \sum_{k=0}^{N_z+4} \varphi_{ik} (1 - \varepsilon_k) f_{kj}, \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, N_z + 4, \quad (2)$$

где φ_{ij} – угловой коэффициент излучения с зоны i на зону j .

Угловые коэффициенты рассчитываются в системе без электронагревателя. Для этого используются аналитические зависимости для простых геометрических конфигураций и свойства угловых коэффициентов [3; 4]. Затем приближенно находится пропускательная способность ряда элементов электронагревателя, равная

$$p = \frac{d \cdot N_e}{2\pi R_n}, \quad (3)$$

где N_e – число цилиндрических элементов нагревателя.

Далее рассчитываются угловые коэффициенты между зонами системы при наличии в ней электронагревателя:

$$\varphi_{ij} = \varphi'_{ij} - \varphi_{i0} (1 - P_{ij}), \quad i, j = 1, 2, \dots, N_z + 4, \quad (4)$$

где φ'_{ij} – угловой коэффициент с зоны i на зону j в системе без электронагревателя; P_{ij} – пропускательная способность нагревателя между зонами i и j .

Пропускательная способность P_{ij} принимает значение p , когда луч проходит один ряд элементов нагревателя, и значение p^2 , когда луч проходит два ряда элементов. В остальных случаях $P_{ij} = 1$. Угловые коэффициенты с поверхностей футеровки и крышки на электронагреватель находятся как:

$$\varphi_{i0} = 1 - \sum_{j=1}^{N_z+4} \varphi_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, N_z + 4. \quad (5)$$

После определения значений плотностей лучистых потоков по формуле (1) для каждого выделенного участка футеровки ковша и крышки решается дифференциальное уравнение теплопроводности в течение малого интервала времени Δt . При этом на внутренней поверхности футеровки задаются граничные условия второго рода для каждого участка. Для наружных поверхностей ковша в качестве граничного условия задается теплообмен с окружающей средой.

Для решения задачи теплопроводности применяется метод конечных разностей. На каждом расчетном участке по толщине стенки вводится равномерная узловая сетка. После

расчета распределения температур в узлах сетки в течение малого интервала времени выполняется пересчет лучистых потоков на зоны системы. Для этого вначале задаются новые значения температур зон, которые принимаются равными значениям температур в узлах сетки соответствующих участков, расположенных на их внутренней поверхности. После этого по формуле (1) рассчитываются плотности тепловых потоков и т. д.

По предложенной выше математической модели был рассчитан разогрев футеровки сталеразливочного ковша емкостью 50 тонн. При этом были приняты следующие основные размеры ковша: средний внутренний радиус ковша $R_1 = 1,04$ м; высота внутреннего пространства $H = 2,5$ м; толщина боковой стенки футеровки и днища $S = 0,22$ м и $S_1 = 0,4$ м соответственно; толщина крышки $S_2 = 0,22$. Было принято, что рабочие поверхности ковша выполнены из шамота, а крышка футерована волокнистыми огнеупорными блоками. На крышке были установлены 10 U-образных карбидокремниевых нагревательных элементов, расположенных по окружности радиусом $R_3 = 0,5$ м. Принимали, что нагреватели имели температуру поверхности 1550 К. Разогрев длился 2 часа.

Изменение плотности теплового потока и температуры поверхности футеровки на разных участках боковой стенки показано на рис. 2.

Максимальное значение результирующей плотности теплового потока на футеровку имеет место в начале разогрева на участке шлакового пояса, что объясняется его близким расположением к нагревателю и крышке стенда (см. рис. 2, а). В результате стремительно поднимается температура поверхности в указанной зоне и интенсивность лучистого теплообмена снижается в два раза за первые 30 минут.

Нагрев верхней зоны боковой поверхности и крышки приводит к увеличению теплового потока на нижние участки за счет переизлучения теплоты. Примерно через час распределение лучистой энергии по зонам выравнивается. В конце расчетного периода перепад температуры по высоте боковой поверхности футеровки ковша составляет 225 °С.

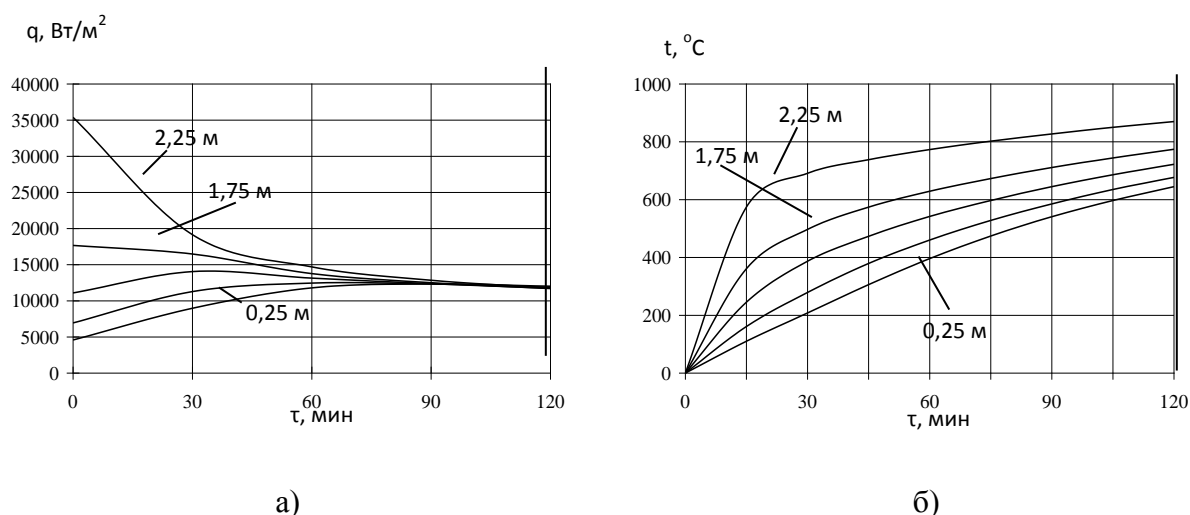


Рис. 2. Изменение плотности теплового потока – а и температуры внутренней поверхности – б при нагреве футеровки ковша на различных участках боковой стенки

На рис. 3 показано распределение температуры по толщине шлакового пояса через 30, 60 и 120 минут от начала разогрева ковша. За первые 30 минут футеровка прогревается на

глубину 90 мм, при этом броня остается холодной, температура здесь начинает подниматься только лишь к окончанию второго часа. Нижняя часть боковой стенки, расположенная возле днища, прогревается хуже (см. рис. 3, б). Однако перепад температур по толщине футеровки в нижней зоне на начальном этапе более чем в три раза ниже, по сравнению с зоной шлакового пояса, что говорит о меньшей вероятности разрушений огнеупоров при разогреве. Температура внутренней поверхности ковша достигает для шлакового пояса 870 °С, а для участка в районе днища 640 °С. Для дальнейшего повышения температуры целесообразно продолжить нагрев и повысить температуру нагревателей за счет повышения подаваемой на них мощности.

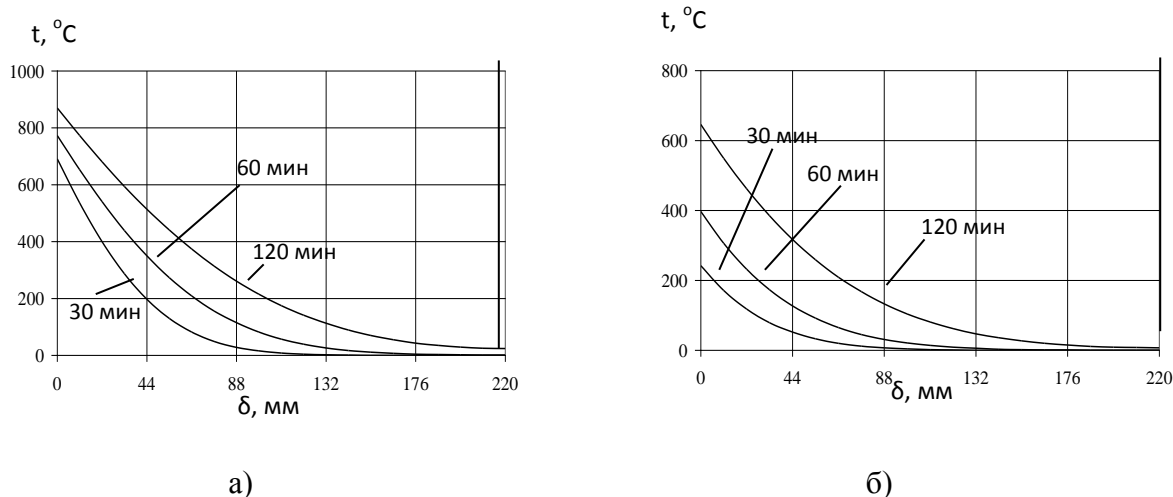


Рис. 3. Распределение температур по толщине боковой стенки ковша в районе шлакового пояса – а и днища – б при нагреве ковша

По результатам расчетов видно, что при разогреве футеровка ковша находится в разных тепловых условиях, что отражается на температурном поле футеровки на протяжении всего процесса. Разработанная математическая модель ковша позволяет учитывать влияние мощности нагревателя, его конфигурации и компоновки, других важных факторов на неравномерность и экономичность нагрева футеровки.

Список использованных источников

1. Вихлевщук В. А., Стороженко А. С., Шкирмонтов А. П. [и др.]. Высокотемпературный нагрев футеровки сталеразливочных ковшей // Черная металлургия. – 1992. № 9. – С. 13–21.
2. Бершицкий И. М., Тарарышкин А. В. Энергосберегающие и экологически безопасные установки для электрической сушки и подогрева футеровки ковшей // Сталь. – 2010. № 2. – С. 24–25.
3. Блох А. Г., Журавлев Ю. А., Рыжков Л. Н. Теплообмен излучением: справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
4. Michael F. Modest. Radiative heat transfer. An imprint of Elsevier Science. New York. Academic Press, 2003. – 822 p.